Journal of Agricultural Machinery

Homepage: https://jame.um.ac.ir

Research Article
Vol. 14, No. 2, 2024, p. 215-234

Balancing Time and Cost in Resource-Constrained Project Scheduling Using Meta-Heuristic Approach

A. Taheri hajivand[1*], K. Shirini[2], S. Samadi Gharehveran[3]

1- Department of Biosystem Engineering, Faculty of Agriculture, Tabriz University, Tabriz, Iran
2- PhD Student of Computer Engineering, Faculty of Electrical and Computer Engineering, Tabriz University, Tabriz, Iran
3- PhD Student of Electrical Engineering, Faculty of Electrical and Computer Engineering, Tabriz University, Tabriz, Iran
(*- Corresponding Author Email: a.taheri@tabrizu.ac.ir)

Received: 24 April 2023 Revised: 25 July 2023 Accepted: 30 July 2023 Available Online: 30 July 2023	**How to cite this article:** Taheri hajivand, A., Shirini, K., & Samadi Gharehveran, S. (2024). Balancing Time and Cost in Resource-Constrained Project Scheduling Using Meta-Heuristic Approach. *Journal of Agricultural Machinery*, *14*(2), 215-234. (in Persian with English abstract). https://doi.org/10.22067/jam.2023.81735.1157

Introduction

Agricultural production involves a series of tasks including tillage, planting, and harvesting, which must be done at the right time for each region and type of product. Failing to complete these tasks on time can lead to a decrease in yield. Farmers may wrongly attribute this to factors such as infertile land, pests, diseases, and uneven rainfall distribution. However, this decrease in yield may not always be evident or tangible. To avoid such losses and unforeseen expenses, it is crucial to plan agricultural mechanization projects using the principles of project control. Agricultural projects, like industrial projects, must be carried out in the correct order and at the right time to achieve optimal results. Given the limited availability of resources for mechanization projects, it is imperative to meticulously plan activities to ensure that they are carried out on time and with maximum utilization of resources. To address these challenges, researchers have used meta-heuristic methods in project control, such as the colonial competition algorithm, which has been proven effective in solving the issue of scheduling projects with limited resources. The algorithm has been tested across various industrial activities and projects, and its performance in scheduling the Resource-Constrained Project Scheduling Problem (RCPSP) has been validated by researchers globally.

Materials and Methods

There is a scheduling issue regarding limited resources in agriculture, and this study presents a novel approach using the imperialist competitive algorithm (ICA). The algorithm not only explores a wider solution space but also strives to minimize deviation from the optimal solution, thereby improving the success rate of the proposed method. This research focuses on two dominant products, wheat and rapeseed, produced in Moghan Agriculture and Industry located in Northwest Iran. To evaluate the effectiveness of ICA, we compared it with other well-known meta-heuristic algorithms. We successfully resolved the problem of project scheduling problem with limited resources by implementing the imperialist competitive algorithm. Our findings have shown that this approach not only significantly increased efficiency but also outperformed other algorithms.

Results and Discussion

In this study, we assessed the efficiency of meta-heuristic methods in solving the RCPSP, which can be useful in optimizing the timeliness of project execution, especially for large-scale projects. Some meta-heuristic methods are only useful for smaller problems, while others can provide near-optimal solutions for larger problems, making them suitable for RCPSP. The algorithm explores a wide range of solutions and avoids premature convergence and getting stuck in local optima, unlike other algorithms such as the genetic algorithm.

https://doi.org/10.22067/jam.2023.81735.1157

Optimization reduced the required budget and shortened the duration by 42 days for wheat and 25 days for rapeseed.

Conclusion

We utilized the colonial competition algorithm to address the RCPSP problem in agricultural mechanization projects for two agricultural products in Moghan. Our results show that the proposed algorithm converged and reached the optimal solution. The proposed algorithm was compared with other algorithms and it outperformed them.

Keywords: Imperialist Competitive Algorithm, Meta-heuristic algorithm, Project scheduling, Resource allocation, Timeliness

نشریه ماشین‌های کشاورزی
https://jame.um.ac.ir

مقاله پژوهشی

جلد ١٤، شماره ٢، تابستان ١٤٠٣، ص ٢٣٤-٢١٥

ارائه الگوریتم بهینه‌سازی فرامکاشفه‌ای برای حل مسأله تخصیص منابع محدود به پروژه‌های مکانیزاسیون کشاورزی: مطالعه موردی دشت مغان

عادل طاهری حاجی‌وند[1*]، کیمیا شیرینی[2]، سینا صمدی قره‌ورن[3]

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۲/۰۴
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۵/۰۸

چکیده

پروژه‌های زمان‌بندی در کشاورزی شامل عملیات و فعالیت‌هایی است که با ترتیب معین و در یک بازه زمانی مشخص انجام می‌گیرند. چنانچه این عملیات و فعالیت‌ها به‌موقع انجام نشوند، به دلیل افت کمی و کیفی محصول، سبب افزایش هزینه‌های واحد کشاورزی و در نتیجه سبب ایجاد هزینه‌های به‌موقع نبودن خواهند شد. انجام به‌موقع عملیات و پروژه‌های مکانیزاسیون کشاورزی یکی از مهم‌ترین مسائلی است که در سال‌های اخیر مدنظر بوده است. برای حل مسأله زمان‌بندی پروژه با منابع محدود روش‌های مختلفی ارائه شده است که هریک سعی در یافتن جواب بهینه می‌باشند. با توجه به این‌که این مسائل از نوع NP-hard می‌باشند، در این پژوهش از الگوریتم رقابت استعماری به‌منظور زمان‌بندی پروژه‌های مکانیزاسیون کشاورزی دو محصول غالب کشت و صنعت مغان استفاده شده‌است. هدف اصلی این زمان‌بندی کمینه‌کردن زمان تکمیل پروژه و کاهش هزینه‌ها است به‌صورتی‌که در انجام به‌موقع عملیات کشاورزی اختلالی ایجاد نشود. اطلاعات مربوط به فعالیت‌ها، منابع مورد نیاز هر فعالیت و پیش‌نیازی فعالیت‌های هر محصول و پارامترهای الگوریتم پیشنهادی برای مساله زمان‌بندی پروژه با منابع محدود مدل‌سازی و پیاده‌سازی شده است و نتایج حاصل از اجرای الگوریتم نشان‌دهنده‌ی موفقیت‌آمیز بودن روش رقابت استعماری در زمان‌بندی و تخصیص بهینه منابع به هر یک از فعالیت‌ها است. الگوریتم رقابت استعماری ارائه‌شده در این مقاله با الگوریتم‌های شناخته‌شده از جمله الگوریتم ژنتیک، الگوریتم پرندگان و الگوریتم بهینه‌سازی مبتنی بر جغرافیای زیستی مقایسه گردیده است. نتایج حاکی از صرفه‌جویی ۲۵ روزه در زمان انجام پروژه‌ها و ۱۶۷۰۰ واحد پولی در هزینه‌ها در روش رقابت استعماری در محصول کلزا و صرفه‌جویی ۴۲ روزه و ۳۲۳۳ واحد پولی در هزینه محصول گندم شده است.

واژه‌های کلیدی: الگوریتم فراابتکاری، به‌موقع‌بودن، تخصیص منابع، رقابت استعماری، زمان‌بندی پروژه

مقدمه

در انجام کارهای مربوط به تولیدات کشاورزی در هر منطقه و با توجه به نوع محصول، برای انجام هر یک از مراحل، خاک‌ورزی، کاشت، داشت و برداشت، یک مدت زمان مناسب وجود دارد که چنانچه عملیات مربوطه در آن محدوده مناسب زمانی انجام نشود باعث افت در میزان عملکرد خواهد شد. کشاورزان، این کاهش عملکرد که به دلیل به‌موقع انجام نشدن عملیات به‌وجود آمده است را به حساب حاصلخیز نبودن زمین، آفات و بیماری‌ها، پراکنش نامناسب نزولات و دیگر عوامل می‌گذارند زیرا این کاهش محصول زیاد ملموس و مشخص نیست (Dumond, & Mabert, 1988, Kiani, 2008). به‌منظور جلوگیری از ایجاد هزینه‌های به‌موقع نبودن، ضروری است تا پروژه‌های مکانیزاسیون کشاورزی همانند پروژه‌های صنعتی به‌صورت علمی و با استفاده از علم کنترل پروژه طرح‌ریزی و برنامه‌ریزی شوند تا فعالیت‌های موجود در جهت به ثمر رسیدن پروژه به‌ترتیبی صحیح و در زمان مناسب انجام گیرند (Abdi, 2009). از آن‌جایی‌که در اجرای هر پروژه تنها عامل زمان در رسیدن به حداکثر سود دخیل نمی‌باشد و عملیات کشاورزی برای اجرا نیازمند منابع هستند و با توجه به این‌که سطح منابع پروژه‌های مکانیزاسیون

۱- استادیار، گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران
۲- دانشجوی دکتری مهندسی کامپیوتر، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران
۳- دانشجوی دکتری مهندسی برق، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران
(*- نویسنده مسئول: Email: a.taheri@tabrizu.ac.ir)
https://doi.org/10.22067/jam.2023.81735.1157

کشاورزی محدود می‌باشد، باید در برنامه‌ریزی فعالیت‌ها و عملیات، پروژه طوری عمل شود که فعالیت‌ها در بهترین زمان و دسترسی به حداکثر منابع ممکن انجام پذیرند، می‌توان از روش‌های فراابتکاری در علم کنترل پروژه استفاده کرد که عملکرد آن در زمان‌بندی پروژه با منابع محدود در خیلی از فعالیت‌ها و پروژه‌های صنعتی به اثبات رسیده است. در این مقاله برای حل مسئله طرح‌ریزی برنامه‌ریزی و زمان‌بندی پروژه و همچنین تخصیص بهینه منابع از الگوریتم رقابت استعماری که جزو روش‌های فراابتکاری در زمان‌بندی پروژه‌هاست استفاده می‌شود که کارایی آن در حل مسئله‌های زمان‌بندی پروژه با منابع محدود (RCPSP)[1] توسط محققان مختلف در سراسر جهان به اثبات رسیده است. برای رسیدن به یک برنامه منسجم که بتواند اهداف پروژه را تامین کند، می‌توان از علم برنامه‌ریزی و زمان‌بندی پروژه[2] کمک گرفت. برنامه‌ریزی و زمان‌بندی پروژه که مهم‌ترین بحث این مقاله است، زیر حوزه خاصی از طرح‌ریزی پروژه[3] بوده که یکی از فرآیندهای اصلی مدیریت پروژه است. زمان‌بندی پروژه یکی از مهم‌ترین مسائل در زمینه مدیریت پروژه محسوب می‌شود. مساله زمان‌بندی پروژه شامل فعالیت‌ها، منابع، روابط پیش‌نیازی و معیارهایی برای ارزیابی کارایی می‌باشد. این مسئله در زمینه‌های مختلفی مورد استفاده قرار می‌گیرد. از کاربردهای این مسئله، می‌توان به نقش گسترده آن در حوزه مهندسی سازه و توسعه نرم‌افزار اشاره کرد. امروزه از تکنیک‌های مدیریت پروژه علاوه بر طرح‌های مختلف صنعتی، نظامی و عمرانی در طرح‌های کشاورزی نیز استفاده کنند.

مدل‌های ابتدایی مدیریت پروژه، پروژه را با در نظر گرفتن منابع نامحدود حل می‌کردند، اما از آن‌جایی‌که این فرض در محیط‌های عملی غیرواقعی است، لذا تاثیر محدودیت منابع بر روی پروژه‌ها در نظر گرفته شد. در این مسئله که زمان‌بندی پروژه با منابع محدود نام دارد، فعالیت‌ها باید به‌گونه‌ای زمان‌بندی شوند که با توجه به محدودیت‌های روابط پیش‌نیازی و ظرفیت منابع، زمان حاصل از پروژه حداقل شود مدل واقعی‌تر این مسئله زمانی مطرح می‌شود که چند حالت اجرای مختلف برای هر یک از فعالیت‌ها تعریف شود. در این صورت مسئله زمان‌بندی مشخص می‌کند که حالت اجرا انتخاب و هر فعالیت در چه زمانی آغاز شود تا تعدادی از اهداف از پیش‌تعریف‌شده محقق شوند. آمارهایی از هزینه‌ها و اثرات به‌موقع نبودن با پژوهش‌های مزرعه‌ای به‌دست آمده‌اند. طبق این پژوهش‌ها تاخیر در عملیات‌های کشاورزی نه تنها منجر به کاهش عملکرد محصول می‌شود، بلکه بر کیفیت محصول نیز تاثیر دارد و این اثر در محصولات مختلف و ارقام مختلف محصولات متفاوت است.

1- Resource Constrained Project Scheduling Problem
2- Project Scheduling
3- Project Planning

متخصصان صنایع غذایی دانشگاه ایالتی میشیگان اظهار کرده‌اند که هرروز تاخیر در برداشت یونجه پس از اول ژوئن یک کاهش ۲/۵٪ در ارزش غذایی آن در پی خواهد داشت. بخش کشاورزی دانشگاه کلیسمون اثر آماری مهمی در هورمون‌پاشی به‌موقع نیافتند، اما مشاهده کردند در زمان برداشت بر کیفیت و عملکرد پنبه و بازده برداشت اثر چشمگیری دارد. در پروژه‌های مکانیزاسیون کشاورزی لازم و ضروری است که عملیات و فعالیت‌های پروژه با یک ترتیب معین در یک بازه زمانی مشخص و کوتاه انجام گیرد در غیر این صورت هزینه‌های به‌موقع انجام نشدن عملیات که هزینه بسیار هنگفتی می‌باشد، پیش خواهد آمد. با توجه به اهمیت شاخص زمان جهت کاهش هزینه‌های مذبور و کاهش لنگی‌های حین کار، تکنیک‌های زمان‌بندی پروژه و مطالعه کار، به‌ویژه مدل‌های شبکه‌ای به‌منظور بررسی دقیق روش انجام کار، کاهش حجم کار و در نتیجه آن، کاهش زمان انجام کار، کاربرد دارند (Gonçalves *et al.*, 2009).

از آن‌جاکه مسئله زمان‌بندی پروژه با منابع محدود جزو مسائل NP-hard است، جواب‌های دقیق برای آن تنها با استفاده از روش‌های قطعی به‌دست می‌آید که این روش‌ها هم فقط برای پروژه‌های کوچک قابل‌استفاده است. روش‌های اکتشافی جایگزینی برای پروژه‌های بزرگ‌تر هستند که بهترین آن‌ها جواب‌های خوبی را در زمان مناسب تولید می‌کند. در این روش برخلاف روش‌های قطعی، تنها بخشی از فضای جستجو که احتمال یافتن جواب در آن بیشتر است مورد توجه قرار می‌گیرد. روش‌های فراابتکافی آخرین نسل از روش‌های اکتشافی هستند که برای حل مسئله RCPSP مورد استفاده قرار گرفتند. در واقع نیاز به جستجو در حل مسائل کاربردی امری غیرقابل‌اجتناب و در عین حال دشوار است. به همین جهت تعداد زیادی از الگوریتم‌های جستجو با فلسفه متفاوت و دامنه استفاده متفاوت به‌وجود آمده‌اند.

در مقاله (Vartouni & Khanli, 2014) یک الگوریتم ژنتیک ترکیبی فازی اصلاح‌شده برای ایجاد این مدل زمان‌بندی پیشنهاد شده‌است. یک مطالعه تجربی از یک مجموعه ماشین‌آلات کشاورزی در استان آنهویی چین نشان داده که مدل‌ها و الگوریتم زمان‌بندی پیشنهادی در این مطالعه می‌توانند کارایی استفاده از مراکز منابع ماشین‌آلات کشاورزی را بهبود بخشد و هزینه‌های استفاده از ماشین‌آلات کشاورزی را کاهش دهد. فیکری و همکاران (Fekri, Amiri, Sajjad, & Golestaneh, 2016) به مطالعه مسئله زمان‌بندی پروژه با منابع محدود چندحالته و چندهدفه پرداخته‌اند. به‌عنوان یک روش حل، الگوریتم ژنتیک مرتب‌سازی غیرمسلط (NSGA2)[4] اتخاذ شده‌است. به‌منظور بهبود کیفیت راه‌حل، روش

4- Non dominated sorting genetic algorithm

پس‌انتشار برای پس‌پردازش و همچنین برای تولید جدید جمعیت پیشنهاد شده‌است. عملکرد الگوریتم و زمان‌های CPU گزارش شده است. علاوه بر این، روش جدیدی برای تولید نمونه‌های تست داده‌های کشاورزی چند پروژه‌ای پیشنهاد شده است و عملکرد الگوریتم از طریق نمونه‌های آزمایشی تولیدشده از طریق این روش تولید داده ارزیابی می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که روش پس‌انتشار برای بهبود کیفیت راه‌حل موفقیت‌آمیز است (Fekri *et al.*, 2016).

فکری و همکاران (Fekri, Amiri, Sajjad, & Golestaneh, 2016) یک الگوریتم تکاملی چندهدفه به نام الگوریتم ژنتیک رتبه‌بندی نامغلوب (NSGA-II) را برای حل مسئله زمان‌بندی پروژه با محدودیت منابع (RCPSP) با حالت‌های عملکردی چندگانه و دو هدف برای به حداقل رساندن ساخت پروژه و استفاده از منابع پیشنهاد کرده است. راه‌حل با یک لیست فعالیت امکان‌پذیر اولویت و یک تخصیص حالت نشان داده می‌شود. یک مثال کشاورزی با دو هدف برای آزمایش عملکرد الگوریتم پیشنهادی استفاده می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که NSGA-II برای حل RCPSP چندهدفه کارآمد است و تقریب‌های چندگانه راه‌حل‌های بهینه پارتو را در یک اجرای الگوریتم پیدا می‌کند (Wang, Lin, & Li, 2005).

در این مقاله ابتدا روش‌های حل مسئله زمان‌بندی پروژه با منابع محدود مورد بررسی قرار گرفته و سپس به معرفی روش پیشنهادی پرداخته می‌شود. الگوریتم مورد استفاده روش رقابت استعماری نام دارد که سعی دارد فضای گسترده‌تری از جواب را برای مسئله مورد بررسی قرار داده و میانگین انحراف از جواب بهینه را برای آن به حداقل برساند برای بررسی میزان موفقیت روش پیشنهادی الگوریتم مذکور با الگوریتم‌های موجود که از جمله الگوریتم‌های مهم فراکتشافی هستند مقایسه شده است. در این تحقیق مسئله زمان‌بندی پروژه با محدودیت منابع با استفاده از یکی از الگوریتم‌های فراکاشفه‌ای حل شده است. الگوریتم رقابت استعماری، کارایی را به‌صورت چشمگیری افزایش داده‌است. کارایی قابل‌رقابت با الگوریتم‌های شناخته‌شده از دیگر دلایل انتخاب این روش می‌باشد.

هدف از انجام پژوهش حاضر، بررسی همزمان دو هدف اصلی شامل: ۱- کاهش زمان انجام پروژه و ۲- کاهش هزینه‌های انجام پروژه با استفاده از الگوریتم فراابتکاری رقابت استعماری می‌باشد. در این مقاله به‌عنوان نوآوری به بررسی دو هدف به‌صورت همزمان در کنار یکدیگر پرداخته خواهد شد.

مواد و روش‌ها

در این پژوهش، زمان‌بندی و مدل‌سازی تخصیص منابع برای پروژه‌های مکانیزاسیون کشاورزی در کشت و صنعت مغان انجام شده است. چرا که برنامه‌ریزی زمان قبل از انجام پروژه و تخصیص بهینه منابع به فعالیت‌های آن تأثیر به‌سزایی در به‌موقع‌بودن کار کشاورزی و کاهش هزینه تولید و در نهایت افزایش درآمد واحد کشاورزی دارد.

دشت حاصل‌خیز مغان که دارای مساحت تقریبی ۳۵۰ هزار هکتار می‌باشد در غرب دریای‌خزر و در شمالی‌ترین بخش از کشور واقع شده است. رودخانه ارس که از بخش شمالی آن عبور می‌کند خط مرزی کشورهای جمهوری اسلامی ایران و جمهوری آذربایجان را تشکیل می‌دهد.

این دشت در ۳۹/۲۰-۳۹/۴۲ درجه شمالی و ۴۷/۳۰-۴۸ درجه نصف‌النهار شرقی واقع شده است در پاره‌ای از مقاطع زمان دارای زمستان‌های نسبتاً سرد است. میانگین گرما در دشت ۲۰/۷ و میانگین سرما ۳/۲ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. حداکثر حرارت در ماه‌های تیر و مرداد به‌ندرت به ۴۰ درجه سانتی‌گراد رسیده و حداقل آن در آذرماه و دی ماه معمولا به ۸ درجه سانتی‌گراد زیر صفر می‌رسد.

جدول ۱- طبقه‌بندی زمین و منطقه‌ای بر اساس طرح کشت و صنعت مغان

Table 1- Land and regional classification based on the Moghan Agriculture and Industry plan

طبقه‌بندی زمین Land classification	مساحت تقریبی (هکتار) Approximate area (hectares)	مساحت تقریبی (درصد) Approximate area (percentage)
خوب قابل آبیاری Good, irrigable	3100	4.13
بالاتر از حد متوسط خوب قابل آبیاری Above average, irrigable	12600	17.5
نسبتاً خوب و قابل آبیاری Fairly good, irrigable	37600	52.22
غیرقابل آبیاری مگر در شرایط ویژه Not irrigable except under special conditions	1200	1.66
درحال حاضر مناسب آبیاری نیست Currently not suitable for irrigation	12900	17.92
غیرقابل آبیاری Not irrigable	4600	6.39

کلیه عملیات زراعی برای تولید دو محصول زراعی اشاره‌شده به‌صورت مکانیزه در جدول ۲ اشاره شده است. این عملیات پایه در یک محدوده خاص زمانی انجام می‌گیرد تا حداکثر سود را برای شرکت داشته باشد. جدول، این محدوده زمانی را برای انجام عملیات کشاورزی در منطقه مغان بیان می‌کند.

جدول ۲- محدوده زمانی انجام عملیات زراعی در منطقه مغان برای محصولات مختلف

Table 2- Time range of agricultural operations in Moghan region for different crops

محصول **Product**	**عملیات کشاورزی** **Agricultural operations**		
	آماده‌سازی زمین Land preparation	کاشت Planting	برداشت Harvest
گندم و کلزا خوراکی و بذری Edible rapeseed and wheat and seeds	۱۵ شهریور تا ۲۰ آذر September 15 to December 20	۲۰ آبان تا ۱۰ دی November 20 to January 10	۱۵ خرداد تا ۲۰ تیر June 15 to July 20

مسائل RCPSP

به‌طور کلی هدف اصلی در حل مسائل RCPSP کمینه‌کردن زمان انجام پروژه است. اما در کنار این، اهداف دیگری نیز از جمله کاهش هزینه و افزایش سوددهی، کارایی منابع و افزایش کیفیت می‌تواند مد نظر باشد. این اهداف همیشه باهم در تضاد هستند. بدیهی است که هرچه اهداف در مسئله افزایش یابد، تضاد بین آن‌ها نیز بیشتر می‌شود. بنابراین برای تعیین ارتباط بین اهداف مسئله و تصمیم‌گیری در مورد آن‌ها نیاز به تعریف یک مکانیزم است مساله زمان‌بندی پروژه با محدودیت منابع (RCPSP) جزء مسائل غیرچندجمله‌ای سخت (NP-Hard) است که برای حل آن، روش‌های ابتکاری و فراابتکاری در مقایسه با راه‌حل‌های دقیق، کارایی بیشتری دارند. در حل مسئله RCPSP، مجموعه فعالیت‌ها، انواع منابع، مدت زمان انجام فعالیت‌ها، میزان منابع مورد نیاز و در دسترس و محدودیت‌های روابط اولویتی به‌عنوان ورودی وارد مسئله می‌شوند و خروجی مسئله یک زمان‌بندی امکان‌پذیر برای فعالیت‌ها می‌باشد که محدودیت‌های مربوط به روابط اولویتی و منابع را برطرف کرده و اهداف تعیین‌شده را تامین می‌کند (Abdolshah, 2014).

رابطه (۱) هدف مسئله یعنی کاهش زمان تکمیل پروژه را بیان می‌کند. محدودیت (۲) اطمینان حاصل می‌کنند که هر فعالیت دقیقا یک بار کامل اجرا می‌شود. محدودیت (۳) به محدودیت روابط پیش‌نیازی بین فعالیت‌ها اشاره می‌کند. مقدار در دسترس هر منبع نیز در هر بازه زمانی با محدودیت (۴) مشخص می‌شود. محدودیت (۵) بیان‌کننده متغیرهای تصمیم‌گیری باینری است.

$$Minimize \sum_{t=EF_{n+1}}^{LF_{n+1}} tx_{n+1,t} + cx_{n+1,t} \qquad (۱)$$

$$subject\ to \sum_{t=EF_j}^{LF_j} x_{jt} = 1\ for\ j = 0, \dots, n \qquad (۲)$$

$$\sum_{t=EF_i}^{LF_j} tx_{it} \le \sum_{t=EF_j}^{LF_j} tx_{jt} - d_j\ for\ all(A_i, A_j)P \qquad (۳)$$

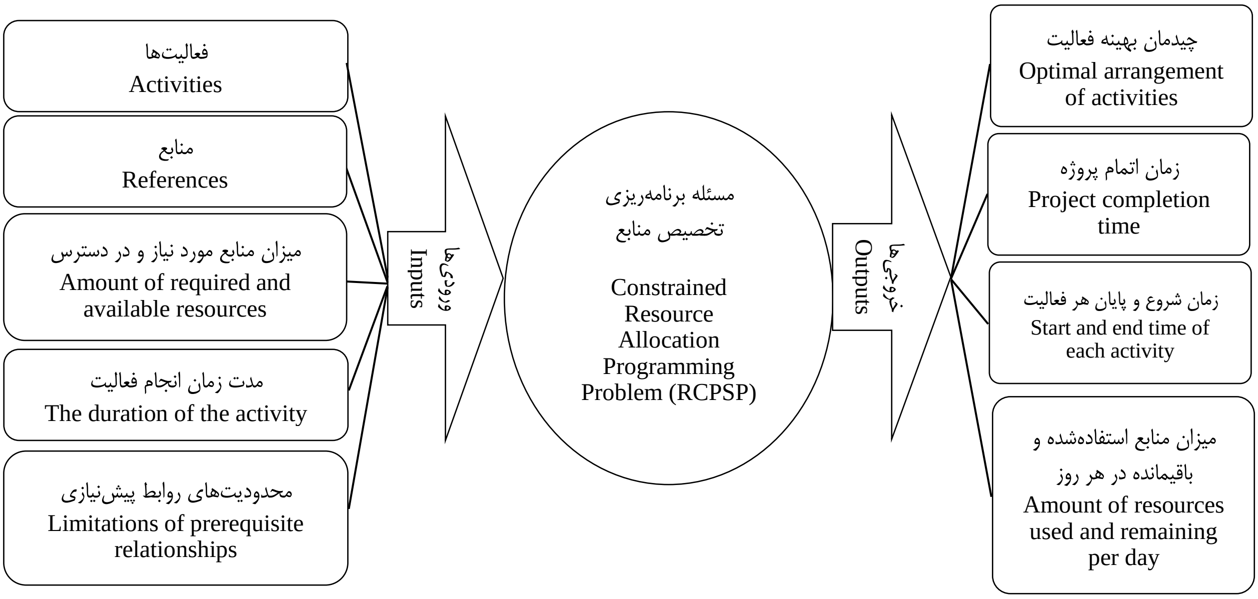
$$\sum_{j=1}^{n} \sum_{q=max\{t,EF_j\}}^{min\{t+d_j-1\}LF_j} r_{jk} x_{jq} \le R_k \qquad (۴)$$

$$for\ k = 1, \dots, R\ and\ t = 1, \dots, H, x_{jt} \in \{0,1\}\ for\ 0, \dots, n+1; t = EF_j, \dots, LF_j \qquad (۵)$$

$$\sum_{t=EF_i}^{LF_j} cx_{it} \le \sum_{t=EF_j}^{LF_j} cx_{jt} - d_j\ for\ all(A_i, A_j)P \qquad (۶)$$

مدل نهایی ارائه‌شده به‌صورت یک مدل برنامه‌ریزی خطی آمیخته با اعداد صحیح است که مسئله به دلیل پیچیدگی بالا جزو مسائل NP Complete قرار می‌گیرد و حل آن در یک زمان چندجمله‌ای کوتاه امکان‌پذیر نیست (Hussain, Mohd Salleh, Cheng, & Shi, 2019). در واقع چون مسئله پیشنهادی شامل مسئله زمان‌بندی پروژه است و هر یک از مسائل زمان‌بندی پروژه به‌طور جداگانه جزو مسائل NP Complete هستند؛ بنابراین مسئله پیشنهادی این پژوهش نیز جزو مسائل NP Complete هستند (Küçüksayacıgil, 2014). حل این دسته از مسائل با ابعاد کوچک با روش‌های دقیق منطقی است؛ اما حل آن‌ها با ابعاد متوسط و بزرگ توسط روش‌های دقیق به علت زمان حل بسیار زیاد توجیه‌پذیر نیست؛ بنابراین استفاده از روش‌های حل ابتکاری و فراابتکاری برای حل و توجیه مسئله ضروری هستند(Mirjalili, 2019). از طرفی برای اعتبارسنجی مدل ریاضی ارائه‌شده پس از تولید مسائل تصادفی نمونه با ابعاد کوچک از روش دقیق استفاده می‌شود. در این پژوهش

با توجه به تعداد زیاد محصولات تولیدی در کشت و صنعت مغان تنها دو محصول غالب تولیدی گندم و کلزا مورد بررسی قرار گرفته است.



شکل ۱– ورودی‌ها و خروجی‌های مسئله RCPSP

Fig.1. Inputs and outputs of the RCPSP problem

الگوریتم رقابت استعماری (ICA[1])

الگوریتم رقابت استعماری ماهیتی پیوسته دارد و این خاصیت آن استفاده از آن در مسائل گسسته را دشوار می‌کند و محقق مجبور خواهد شد از کلیدهای تصادفی برای تبدیل اعداد گسسته به ماهیت پیوسته استفاده کند که این امر تا حد زیادی از کارایی الگوریتم رقابت استعماری خواهد کاست. در این تحقیق با اصلاح ماهیت الگوریتم رقابت استعماری گونه‌ای خاص از آن به‌منظور حل مسائل گسسته جایگشتی (همچون مسئلهRCPSP) ایجاد شده است. ازآنجاکه مسئله موردبررسی ازجمله مسائل NP-hard است، برای حل آن دو الگوریتم رقابت استعماری توسعه داده می‌شود .الگوریتم رقابت استعماری یک الگوریتم فراابتکاری مبتنی بر جمعیت است. این الگوریتم نخستین بار توسط آتش‌پز و لوکاس (۲۰۰۷) ارائه شد. معمولاً الگوریتم‌های فراابتکاری از یک پدیده طبیعی الهام می‌گیرند. این الگوریتم علاوه بر توجه به تکامل زیستی انسان و سایر موجودات، به تکامل اجتماعی و تاریخی او به‌عنوان پیچیده‌ترین و موفق‌ترین حالت تکامل، توجه می‌کند.

مرحله راه‌اندازی اولیه و شرایط توقف

نخستین مرحله الگوریتم شامل نحوه نمایش جواب، تولید جمعیت اولیه و شکل‌دهی امپراطوری‌های اولیه است. در روش نمایش جایگشتی برای این مسئله جواب تا زمانی که در جایگشت به‌صورت کامل رعایت شود جواب همیشه امکان‌پذیر است و هیچ‌یک از عملگرها کامل‌بودن جایگشت را از بین نمی‌برند. تابع هزینه هر یک از کشورها محاسبه می‌شود و به تعداد امپراطوری، از بهترین اعضای این جمعیت که دارای کمترین مقدار تابع هزینه هستند، به‌عنوان استعمارگر انتخاب می‌شوند. جمعیت باقیمانده به‌عنوان کشورهای مستعمره هستند که هر یک به یک امپراطوری تعلق دارند. برای تقسیم مستعمرات اولیه در میان استعمارگرها از «انتخاب چرخه رولت» استفاده شده است. برای انجام این کار با داشتن هزینه همه استعمارگرها، هزینه آن‌ها بر اساس رابطه (۷) محاسبه می‌شود.

$$C_j = \max\left\{r_j C_K + q_{Kj} s_{kj}\right\} \quad (۷)$$

روش چرخه رولت یکی از معروف‌ترین روش‌های انتخابی است. در این روش ابتدا تمام مقادیر احتمال انتخاب در کنار یکدیگر چیده‌شده و سپس یک عدد تصادفی در بازه صفر تا یک تولید می‌شود. انتخاب این بازه به این دلیل است که مجموع مقادیر احتمال انتخاب، همیشه برابر با یک خواهد بود. از مقایسه عدد تصادفی با بازه چرخه رولت، شماره استعمارگر متناظر با عدد تصادفی مشخص می‌شود. از آن‌جاکه مقدار احتمال هر استعمارگر، بخشی از فضای چرخ رولت را به خود اختصاص داده است، احتمال انتخاب استعمارگرهای شایسته‌تر (دارای تابع هزینه‌ی کمتر) بیشتر خواهد بود. با این روش همه کشورهای مستعمره به استعمارگرها تخصیص داده می‌شوند و با

1- Imperialist Competitive Algorithm

داشتن حالت اولیه تمام امپراطوری‌ها، الگوریتم رقابت استعماری شروع می‌شود. روند تکامل در یک حلقه قرار دارد که تا برآورده‌شدن شرط توقف، ادامه می‌یابد.

عملگر جذب و انقلاب

در هر امپراطوری، کشور استعمارگر به‌منظور افزایش نفوذ خود سعی می‌کند تعداد مستعمره‌هایش را افزایش دهد؛ بنابراین در هر امپراطوری، کشورهای مستعمره به سمت استعمارگر مربوطه حرکت می‌کنند.

بروز انقلاب، تغییرات ناگهانی در ویژگی‌های اجتماعی سیاسی یک کشور ایجاد می‌کند. در الگوریتم رقابت استعماری، انقلاب با جابه‌جایی تصادفی یک کشور مستعمره به یک موقعیت تصادفی جدید مدل‌سازی می‌شود. انقلاب از دیدگاه الگوریتمی باعث می‌شود که حرکت تکاملی از گیرکردن در دام بهینه موضعی نجات یابد که در بعضی موارد باعث بهبود موقعیت یک کشور می‌شود و آن را به محدوده‌های که وضعیت بهتری دارد، انتقال می‌دهد. در الگوریتم پیشنهادشده، در هر امپراطوری هر یک از مستعمره‌ها با احتمال مشخص‌شده‌ای، انقلاب خواهند کرد. در این عملگر، دو کار به تصادف انتخاب شده و جای دو کار با هم جابه‌جا می‌شود. در حین حرکت مستعمرات به سمت کشور استعمارگر و اجرای سیاست انقلاب، ممکن است بعضی از این مستعمرات به موقعیت بهتری نسبت به کشور استعمارگر دست یابند. در این حالت استعمارگر و مستعمره جای خود را با یکدیگر عوض می‌کنند و الگوریتم با کشور استعمارگر در موقعیت جدید ادامه خواهد یافت. در ادامه، این کشور استعمارگر جدید است که شروع به اعمال سیاست همگون‌سازی بر مستعمرات خود می‌کند.

قدرت امپراطوری، رقابت استعماری و حذف امپراطوری‌های ضعیف

قدرت کشور استعمارگر به اضافه درصدی از قدرت کل مستعمرات آن، قدرت کل یک امپراطوری است؛ بنابراین هزینه کل یک امپراطوری از طریق رابطه (۸) محاسبه می‌شود:

$$emp_j.\text{Totalcost} = \text{emp}_j\,\text{Imp.Cost} + \psi \times \frac{1}{n_{col_i}} \times \sum_{i=1}^{n_{col_i}} emp_j.Col_i.\cos t \qquad (۸)$$

$$where\;\; 0 < \omega < 1.$$

هر امپراطوری که نتواند بر قدرت خود بیفزاید و قدرت رقابت خود از دست بدهد در جریان رقابت‌های استعمارگری حذف خواهد شد. برای مدل کردن این واقعیت فرض می‌شود که امپراطوری در حال حذف، ضعیف‌ترین امپراطوری موجود است؛ بنابراین در هر تکرار از الگوریتم یک یا تعدادی از ضعیف‌ترین مستعمرات، ضعیف‌ترین امپراطوری را برداشته و برای تصاحب این مستعمرات رقابتی در میان کلیه امپراطوری‌ها ایجاد می‌شود. مستعمرات یادشدنه‌لزوماً توسط قوی‌ترین امپراطوری تصاحب نخواهد شد. بلکه امپراطوری‌های قوی‌تر احتمال تصاحب بیشتری دارند. احتمال تصاحب مستعمره رقابت توسط هر امپراطوری از طریق رابطه (۹) محاسبه می‌شود:

$$p_i = \frac{\exp\left\{-\alpha.\left[imp_j \cos/\max(\text{Imp}_j \text{cost})\right]\right\}}{\sum_{j\in \text{Imp}} \exp\left\{-\alpha.\left[\text{Imp}_j.Cost/\max(\text{Imp}_j \text{cost})\right]\right\}} \qquad (۹)$$

طبق تحقیقات انجام‌شده الگوریتم رقابت استعماری نسبت به الگوریتم ازدحام ذرات و ژنتیک همگرایی بهتری برای رسیدن به جواب مسئله را دارد. در تشریح مراحل این الگوریتم برای به‌دست‌آوردن جواب بهینه یک یا چند مستعمره از ضعیف‌ترین امپراتوری انتخاب‌شده و به امپراتوری‌های قوی‌تر تزریق می‌شود و سپس امپراتوری ضعیف حذف می‌شود. این عمل به جواب‌های ضعیف شانس مجدد می‌دهد و در مراحل بعدی احتمال بقا و قدرتمند شدن آن را فراهم می‌کند این‌گونه کارکرد در ژنتیک و ازدحام ذرات وجود ندارد. علاوه بر آن الگوریتم رقابت استعماری علاوه بر پیدا کردن جواب‌های سراسری از مسئله امکان بهبود این جواب‌ها به‌صورت محلی را نیز دارا هست. این ویژگی‌ها سبب شده تا الگوریتم رقابت استعماری نسبت به الگوریتم‌های تکاملی دیگر عملکرد بهتری از خود نشان دهد. از ویژگی‌های این الگوریتم نو بودن ایده، مبتنی بر رفتار اجتماعی انسان که هوشمندانه‌تر از رفتارهای بیولوژیکی است، سرعت همگرایی بالا، توانایی بهینه‌سازی توابعی با تعداد متغیرهای بسیار زیاد، سرعت یافتن جواب بهینه، توانایی بهینه‌سازی خوب را می‌توان بیان کرد (Xing & Gao, 2014). الگوریتم محاسبه جواب ابتدایی الگوریتم رقابت استعماری در این مقاله بر مبنای محدودیت‌های پیش‌نیازی بین فعالیت بنا نهاده شده‌است.

الگوریتم ژنتیک (GA[1])

الگوریتم‌های ژنتیک نوعی الگوریتم بهینه‌سازی هستند که می‌توانند برای حل مسائل زمان‌بندی محدود منابع (RCSP) استفاده شوند. ایده اصلی پشت الگوریتم‌های ژنتیک تقلید از فرآیند انتخاب طبیعی و تکامل برای یافتن راه‌حل بهینه است. در مورد RCSPها، الگوریتم‌های ژنتیک با ایجاد جمعیتی از راه‌حل‌های بالقوه کار می‌کنند که هرکدام به‌صورت رشته‌ای از ژن‌ها نمایش داده می‌شوند. این ژن‌ها تصمیم‌های زمان‌بندی متفاوتی را نشان می‌دهند، مانند این‌که کدام وظایف در چه زمان‌هایی و بر اساس کدام منابع باید برنامه‌ریزی شود. سپس الگوریتم ژنتیک هر راه‌حل بالقوه را بر اساس تناسب آن، یا این‌که چقدر محدودیت‌ها و اهداف RCSP را برآورده می‌کند،

1- Genetic algorithm

ارزیابی می‌کند. سپس مناسب‌ترین محلول‌ها برای تولید مثل انتخاب می‌شوند، جایی‌که ژن‌های آن‌ها ترکیب می‌شوند و برای ایجاد راه‌حل‌های بالقوه جدید جهش می‌یابند. این فرآیند در چندین نسل تکرار می‌شود و مناسب‌ترین راه‌حل‌ها از هر نسل برای تولید مثل انتخاب می‌شوند. با گذشت زمان، این فرآیند بر روی یک راه‌حل بهینه که تمام محدودیت‌ها و اهداف RCSP را برآورده می‌کند، همگرا می‌شود. به‌طور خلاصه، الگوریتم‌های ژنتیک RCSPها را با استفاده از انتخاب طبیعی و تکامل برای ایجاد و اصلاح جمعیتی از راه‌حل‌های بالقوه تا زمانی‌که یک راه‌حل بهینه پیدا شود، حل می‌کنند.

الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO)[1]

الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO) یک تکنیک بهینه‌سازی فراابتکاری است که می‌تواند برای حل مسائل مختلف بهینه‌سازی از جمله مسئله زمان‌بندی محدود منابع (RCSP) استفاده شود. RCSP یک مشکل شناخته‌شده در تحقیقات عملیاتی است که شامل زمان‌بندی وظایف مشروط به محدودیت منابع است. در PSO، جمعیتی از ذرات در فضای جستجو برای یافتن راه‌حل بهینه حرکت می‌کنند. هر ذره نشان‌دهنده‌ی یک محلول بالقوه است و یک بردار موقعیت و سرعت دارد. بردار موقعیت نشان‌دهنده راه‌حل فعلی است، در حالی‌که بردار سرعت نشان‌دهنده‌ی جهت و بزرگی حرکت در فضای جستجو است. برای اعمال PSO برای حل RCSP، باید تابع تناسب را تعریف کنیم که راه‌حل هر ذره را ارزیابی می‌کند. تابع تناسب باید هم تابع هدف (به‌عنوان مثال، به حداقل رساندن طول عمر) و هم محدودیت‌های منابع را در نظر بگیرد. تابع هدف میزان عملکرد یک برنامه زمانی خاص را از نظر زمان یا هزینه اندازه‌گیری می‌کند، در حالی‌که محدودیت‌های منبع تضمین می‌کند که هر وظیفه به یک منبع در دسترس اختصاص داده شده است. در طول هر تکرار PSO، هر ذره موقعیت و سرعت خود را بر اساس بهترین راه‌حل خود تاکنون (بهترین راه‌حل شخصی) و بهترین راه‌حل یافت‌شده توسط هر ذره در ازدحام (بهترین راه‌حل جهانی) به‌روز می‌کند. قانون به‌روزرسانی برای بردارهای موقعیت و سرعت به پارامترهای مختلفی مانند وزن اینرسی، مؤلفه شناختی و مؤلفه اجتماعی بستگی دارد. الگوریتم PSO تا رسیدن به یک معیار توقف مانند رسیدن به حداکثر تعداد تکرار یا دستیابی به یک مقدار تناسب رضایت‌بخش ادامه می‌یابد. در این مرحله، یک زمان‌بندی بهینه به‌دست آمد که تمام محدودیت‌های منابع را برآورده می‌کند و در عین حال مقدار makepan یا سایر توابع هدف را به حداقل می‌رساند. به‌طور خلاصه، PSO یک تکنیک بهینه‌سازی موثر برای حل RCSP با جستجوی یک زمان‌بندی بهینه است که تمام محدودیت‌های منابع را برآورده می‌کند و در عین حال، طول عمر یا سایر توابع هدف را به حداقل می‌رساند.

1- Particle swarm optimization

الگوریتم بهینه‌سازی مبتنی بر جغرافیای زیستی (BBO)

الگوریتم بهینه‌سازی مبتنی بر جغرافیای زیستی (BBO) یک الگوریتم بهینه‌سازی الهام‌گرفته از طبیعت است که فرآیندهای جغرافیایی زیستی مهاجرت و تکامل گونه‌ها را تقلید می‌کند. BBO برای حل مسائل مختلف بهینه‌سازی، از جمله مسائل زمان‌بندی محدود منابع (RCSP) استفاده شده است. RCSP یک مشکل پیچیده است که شامل تخصیص منابع به وظایف و در عین حال ارضای محدودیت‌های مختلف مانند زمان، هزینه و در دسترس بودن منابع است. از BBO می‌توان برای حل RCSP با نمایش مسئله به‌عنوان مجموعه‌ای از متغیرهای تصمیم‌گیری و محدودیت‌ها استفاده کرد. الگوریتم BBO با مقداردهی اولیه جمعیتی از راه‌حل‌های کاندید شروع می‌شود که به‌عنوان بردار متغیرهای تصمیم نشان داده می‌شوند. سپس این راه‌حل‌ها بر اساس تناسب آن‌ها ارزیابی می‌شوند، که مشخص می‌شود تا چه حد محدودیت‌های مسئله RCSP را برآورده می‌کنند. سپس الگوریتم BBO از عملگرهای مهاجرت و جهش برای تولید راه‌حل‌های کاندید جدید از جمعیت موجود استفاده می‌کند. مهاجرت شامل تبادل اطلاعات بین راه‌حل‌های مختلف در جمعیت است، در حالی‌که جهش شامل تغییر تصادفی برخی از متغیرهای تصمیم در یک راه‌حل است. سپس راه‌حل‌های نامزد جدید برای تناسب اندام ارزیابی می‌شوند و بهترین‌ها برای تشکیل نسل بعدی راه‌حل‌ها انتخاب می‌شوند. این روند تا زمانی ادامه می یابد که یک راه‌حل رضایت‌بخش پیدا شود یا به حداکثر تعداد تکرار برسد. به‌طور کلی، BBO با استفاده از فرآیندهای جغرافیایی زیستی برای ایجاد راه‌حل‌های با کیفیت بالا که محدودیت‌های پیچیده را برآورده می‌کند، یک رویکرد مؤثر برای حل مشکلات RCSP ارائه می‌کند.

نتایج و بحث

در این پژوهش با توجه به تعداد زیاد محصولات تولیدی در کشت و صنعت مغان، دو محصول غالب تولیدی یعنی گندم و کلزا مورد بررسی قرار گرفته‌است، لذا عملیات مذکور روی این محصولات انجام گرفته است. در اولین قدم از زمان‌بندی پروژه نمودار WBS[2]به روش RWBS برای پروژه مکانیزاسیون کشاورزی هر دو محصول فوق‌الذکر تهیه گردیده است. ابتدا نمودار PBS[3]برای محصولات که در شکل ۳ مشخص شده است و سپس نمودار FBS[4]مطابق شکل ۴

2- Work Breakdown Structure

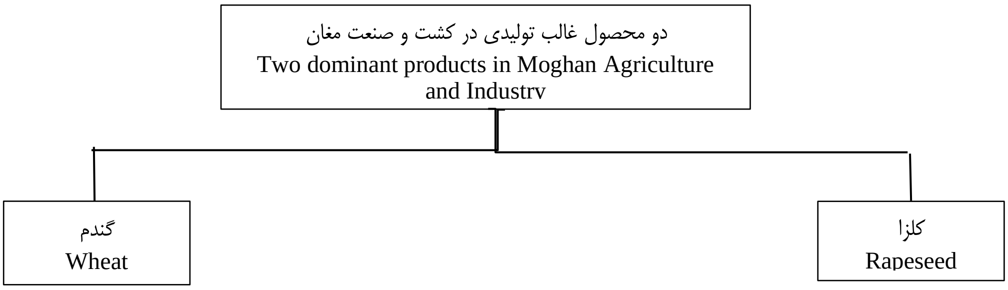
3- Product Breakdown Structure

4- Structure Breakdown Functional

نشان‌دهنده‌ی فعالیت‌های مکانیزاسیون کشاورزی است.

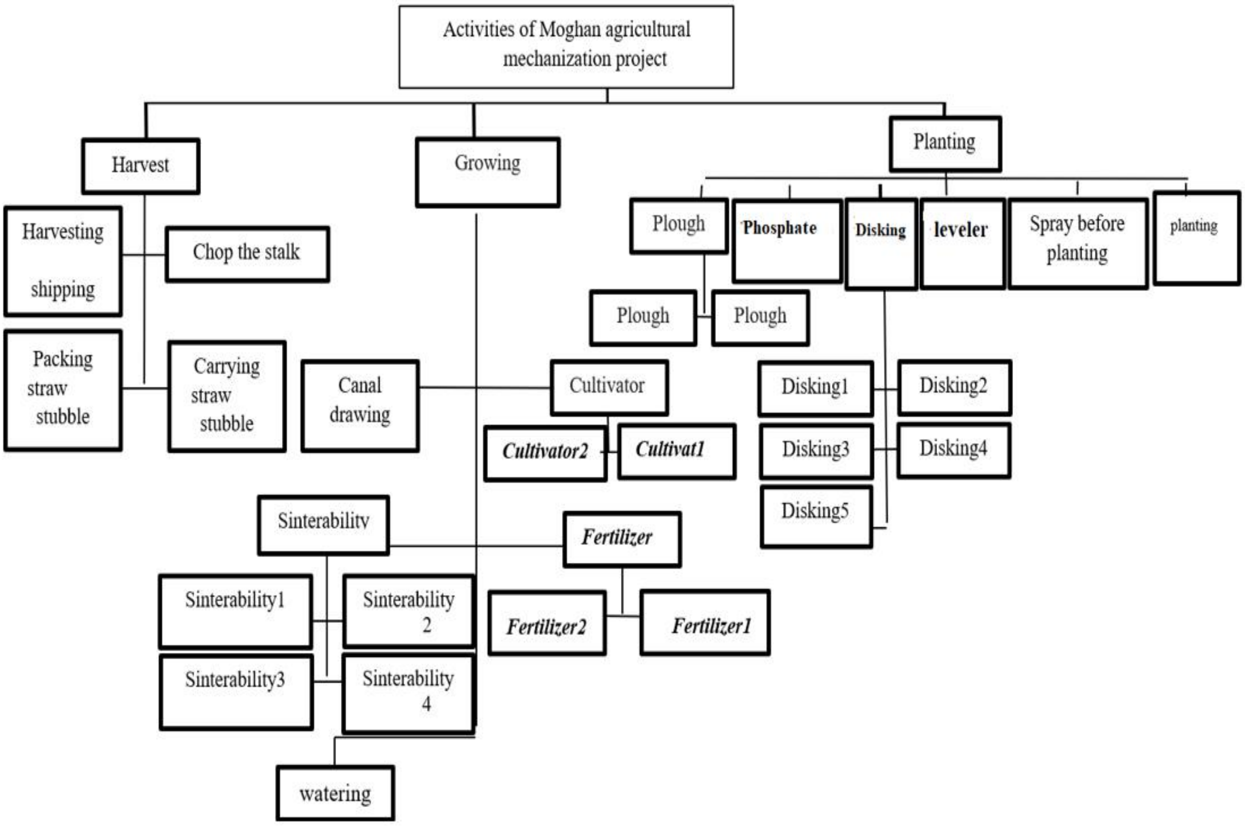
برآورد زمان انجام فعالیت‌ها و اطلاعات مربوط به منابع

تخمین زمان انجام فعالیت‌ها با استناد به تحقیقات انجام‌شده توسط (Hourzadeh, 2013) صورت گرفته است. این پیش‌بینی زمان فعالیت‌ها براساس توزیع سه پارامتری بتا که در برآورد فعالیت‌ها در شبکه‌های PERT استفاده می‌شود، انجام می‌گیرد. جداول ۳ و ۴ نشان‌دهنده‌ی زمان انجام فعالیت‌ها و همچنین اطلاعات مربوط به منابع استفاده‌شده برای هر فعالیت به‌صورت جداگانه می‌باشد.



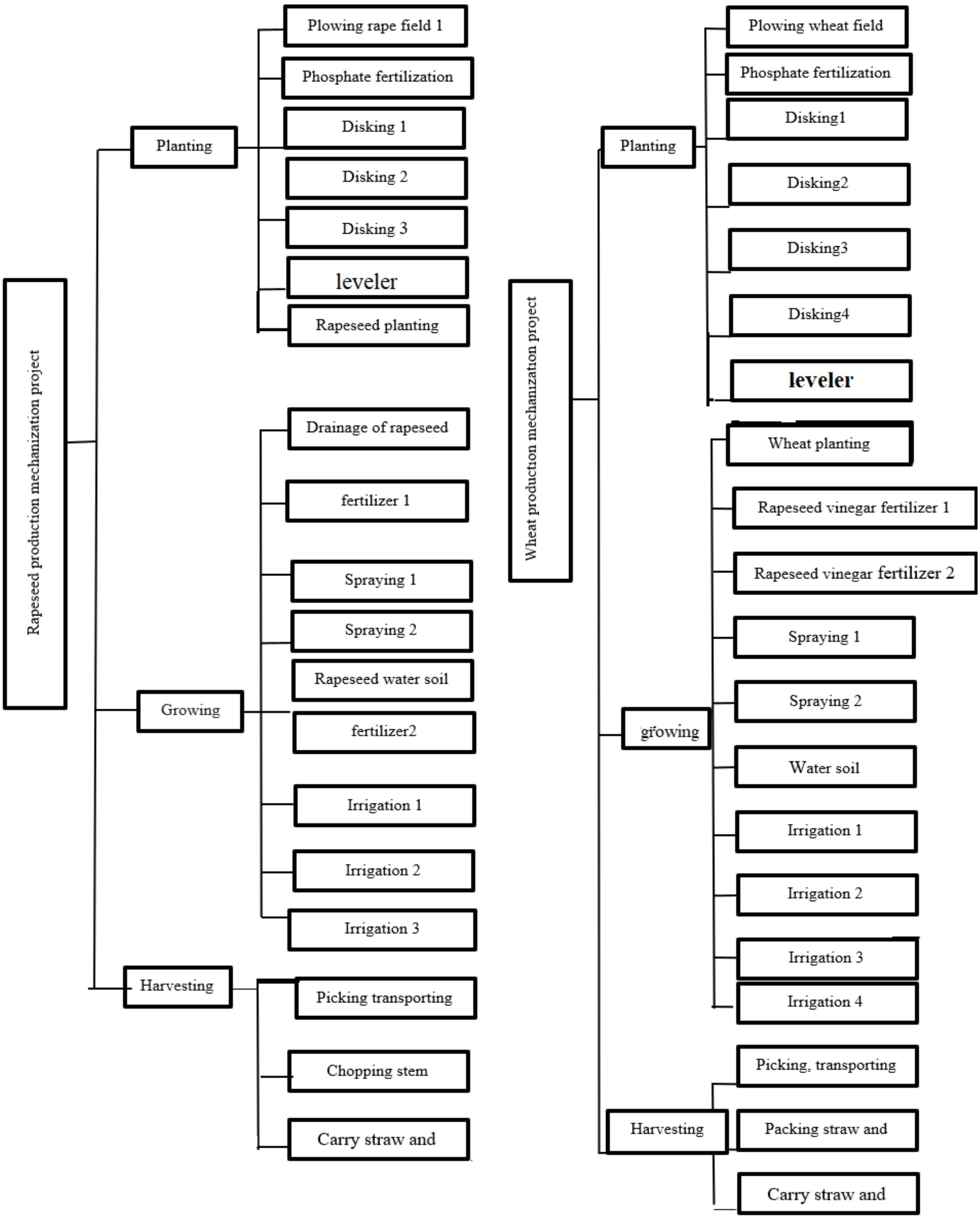
شکل ۲- نمودار PBS ساختار شکست کار دو محصول گندم و کانولا تولیدی در کشت و صنعت مغان

Fig.2. PBS diagram of the work breakdown structure of wheat and rapeseed produced by Moghan Agriculture and Industry



شکل ۳- نمودار FBS ساختار شکست کار فعالیت‌های پروژه

Fig.3. FBS diagram of the work breakdown structure of the project activities



شکل ٤- نمودار نهایی WBS برای دو محصول کلزا و گندم

Fig.4. The final WBS chart for the two products rapeseed and wheat

جدول ۳- مدت زمان انجام، پیش‌نیازی و منابع مورد نیاز برای هر فعالیت برای محصول کلزا

Table 3- Duration, prerequisites and required resources for each activity for the rapeseed crop

فعالیت‌های پروژه مکانیزاسیون کلزا **Rapeseed mechanization project activities**						
فعالیت **Activity**	**کد فعالیت** **Activity code**	**زمان انجام فعالیت** **Activity time (days)**	**پیش‌نیاز فعالیت** **Activity prerequisite**	**منبع ماشین‌آلات** **Source of machinery**	**منبع نیروی انسانی** **Human resource**	**منبع مالی (میلیون ریال)** **Financial source (million Rials)**
شروع Start	R01	0	ندارد None	0	0	0
شخم‌زنی زمین Plowing field	R02	16	R01	47	47	532
کوددهی فسفاته زمین Phosphate fertilization	R04	2	R05&06	25	50	358
دیسک‌زنی زمین ۱ field disking 1	R05	4	R02	48	48	255
دیسک‌زنی زمین ۲ field disking 2	R06	4	R02	48	48	222
دیسک‌زنی زمین ۳ field disking 3	R07	4	R04	48	48	222
لولر زمین field leveling	R09	5	R07	64	64	251
کاشت کلزا Rapeseed planting	R12	7	R09	34	68	172
نهرکشی زمین Drainage of land	R13	4	R12	12	12	78
کود سرک ۱ fertilizer 1	R14	3	R23	17	34	1303
کود سرک کلزا۲ fertilizer 2	R15	3	R24	17	34	2528
سم‌پاشی ۱ Spraying 1	R16	3	R23	23	46	3298
سم‌پاشی ۲ Spraying 2	R17	4	R24	17	34	657
خاک آب water soil	R22	5	R13	0	90	981
آبیاری ۱ Irrigation 1	R23	5	R22	0	90	885
آبیاری ۲ Irrigation 2	R24	5	R14&16	0	90	750
آبیاری ۳ Irrigation 3	R25	5	R15&17	0	90	750
برداشت و حمل کلزا Picking and transporting rapeseed	R29	9	R25	34	68	5310
ساقه خردکنی کلزا Chopping rapeseed stalks	R30	3	R29	16	16	123
پایان End	R33	0	R30	0	0	0
	حداکثر منابع در روز Maximum resources per day			64	88	2800

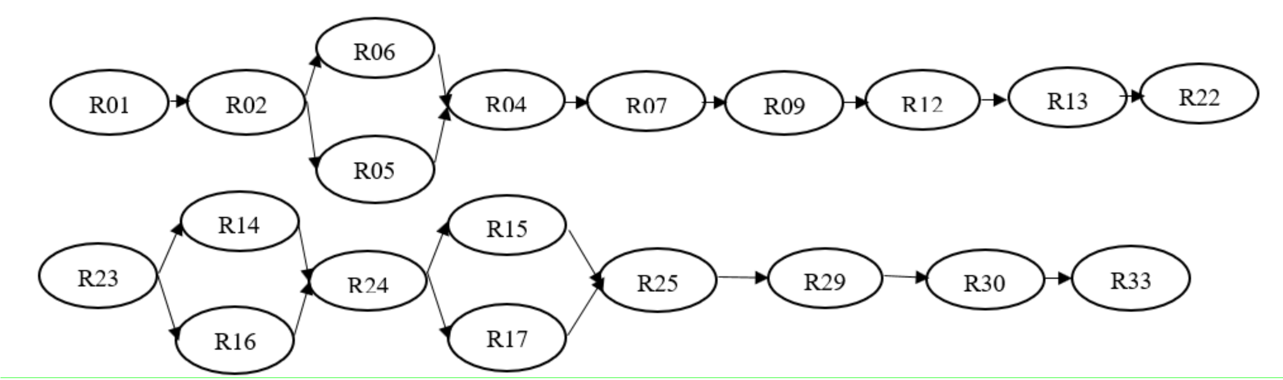
جدول ٤- مدت زمان انجام، پیش‌نیازی و منابع مورد نیاز برای هر فعالیت برای محصول گندم

Table 4- Duration, prerequisites, and required resources for each activity for the rapeseed crop

فعالیت‌های پروژه مکانیزاسیون گندم Wheat mechanization project activities						
فعالیت Activity	کد فعالیت Activity code	زمان انجام فعالیت Activity time (days)	پیش‌نیاز فعالیت Activity prerequisite	منبع ماشین‌آلات Source of machinery	منبع نیروی انسانی Human resource	منبع مالی (میلیون ریال) Financial source (million Rials)
شروع Start	W01	0	ندارد None	0	0	0
شخم‌زنی زمین گندم Plowing field	W02	27	W01	62	62	1210
کوددهی فسفاته Phosphate fertilization	W04	8	W05 & W06	14	42	6172
دیسک‌زنی زمین ۱ field disking 1	W05	11	W02	57	57	560
دیسک‌زنی زمین ۲ field disking 2	W06	10	W02	42	42	495
دیسک‌زنی زمین ۳ field disking 3	W07	10	W04	42	42	452
دیسک‌زنی زمین ۴ field disking 4	W08	14	W12	30	30	450
لولر زمین field leveling	W9	16	W07	44	44	550
کاشت گندم Wheat planting	W12	20	W09	26	52	383
نهرکشی زمین Drainage of land	W13	8	W08	12	12	158
کود سرک ۱ Fertilizer 1	W14	4	W23	28	56	2845
کود سرک ۲ Fertilizer 2	W15	5	W24	22	44	5537
سم‌پاشی ۱ Spraying 1	W16	7	W23	22	44	7221
سم‌پاشی ۲ Spraying 2	W17	10	W24	15	30	1417
خاک آب گندم Water soil	W22	12	W13	0	84	2065
آبیاری ۱ Irrigation 1	W23	8	W22	0	84	1867
آبیاری ۲ Irrigation 2	W24	8	W14 & W16	0	84	1578
آبیاری ۳ Irrigation 3	W25	8	W15 & W17	0	84	1578
آبیاری ۴ Irrigation 4	W26	8	W25	0	84	1578
برداشت و حمل گندم Harvesting and transporting wheat	W29	16	W26	42	84	9000
بسته‌بندی کاه و کلش گندم Packing straw and wheat stubble	W31	10	W29	5	10	370
حمل کاه و کلش گندم Carrying wheat straw and stubble	W32	5	W31	6	18	238
پایان End	W33	0	W32	0	0	0
	حداکثر منابع در روز Maximum resources per day			61	84	5800

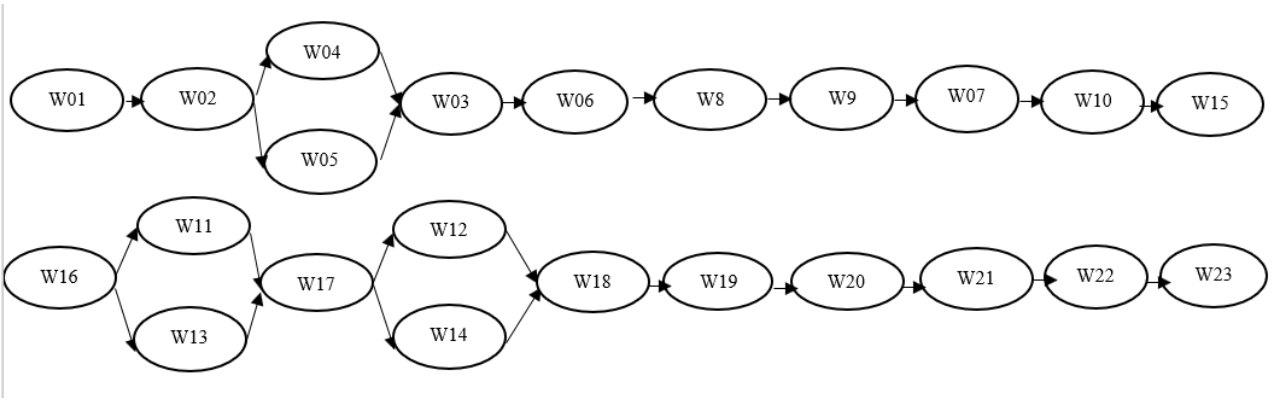
نمایش شبکه‌ای پروژه‌های مکانیزاسیون

بعد از مشخص شدن روابط وابستگی طبیعی و امکانی بین فعالیت‌های پروژه مکانیزاسیون دو محصول، مدل شبکه‌ای برای پروژه‌ها رسم شد که نتایج آن در شکل‌های ۵ و ۶ آمده است. در این مدل شبکه‌ای فعالیت‌ها با دایره‌ها و مسیرها با بردار مشخص شده‌اند. کد فعالیت‌ها داخل دایره‌ها نوشته شده است.



شکل ۵- مدل شبکه‌ای پروژه مکانیزاسیون کلزا

Fig.5. Network model of rapeseed mechanization project



شکل ٦- مدل شبکه‌ای پروژه مکانیزاسیون گندم

Fig.6. Network model of wheat mechanization project

نتایج برنامه‌ریزی منابع با استفاده از الگوریتم رقابت استعماری

به‌منظور بررسی میزان موفقیت الگوریتم پیشنهادی از شبیه‌سازی کامپیوتری استفاده شده است. به همین جهت برنامه‌نویسی این الگوریتم در محیط برنامه‌نویسی نرم‌افزار MATLAB انجام‌شده و بر روی پروژه‌های مکانیزاسیون کشاورزی محصولات گندم و کلزا که اطلاعات این پروژه در جداول ۱ و ۲ برآورد شده است پیاده‌سازی‌شده است. در همین راستا به‌منظور مقایسه کارایی الگوریتم پیشنهادی این پروژه مکانیزاسیون کشاورزی با استفاده از الگوریتم ژنتیک (Wang *et al.*, 2005)، تخمین توزیع (Larrañaga, 2002) و الگوریتم پرندگان (Paraskevopoulos, Tarantilis, & Ioannou, 2016) علاوه بر این موضوع پژوهش انجام‌شده و نتایج آن‌ها با یکدیگر مورد ارزیابی قرار گرفته است. به‌منظور حل مسأله زمان‌بندی پروژه‌های مکانیزاسیون کشاورزی با منابع محدود، الگوریتم پیشنهادی در نرم‌افزار MATLAB کدنویسی و اجرا شده است. ورودی‌های این الگوریتم شامل لیست پیش‌نیازی فعالیت‌ها، منابع مورد نیاز برای هر فعالیت، زمان مورد نیاز برای هر فعالیت و حداکثر منابع موجود در هر روز که برای هر یک از پروژه‌های مکانیزاسیون کشاورزی محصولات به‌صورت جداگانه محاسبه شده است. در اجرای الگوریتم متغیر موردنظر، چیدمان فعالیت‌ها می‌باشد. هدف کمینه‌کردن زمان اتمام پروژه و هزینه ناشی از انجام فعالیت‌ها است. محدودیت‌هایی در اجرای الگوریتم وجود دارد که شامل وجود پیش‌نیازهای همه فعالیت‌ها و محدودیت منابع می‌باشد. هر فعالیت باید بعد از اتمام پیش‌نیازهای خود شروع به فعالیت کند شود و همچنین هر فعالیت در روزهایی می‌تواند انجام شود که منابع مورد نیاز آن موجود باشد.

چیدمان بهینه فعالیت‌ها، زمان اتمام پروژه، زمان شروع و پایان هر فعالیت و میزان منابع استفاده‌شده و باقی‌مانده در هر روز، خروجی هستند.

در این قسمت از بررسی نتایج به سبب این‌که در جواب ارائه‌شده بین الگوریتم‌های ژنتیک و الگوریتم پرندگان و الگوریتم رقابت استعماری تفاوت‌هایی وجود دارد، مقایسه‌ای بین این دو الگوریتم صورت گرفته است. به همین منظور، بررسی همگرایی الگوریتم‌های PSO، ICA و GA به جواب بهینه مورد استفاده قرار گرفت. در همین راستا اطلاعات مربوط به پروژه‌های مکانیزاسیون کشاورزی به هر دو الگوریتم داده شده است و نتایج آن‌ها از جمله بهترین زمان تکمیل پروژه و میانگین زمان تکمیل پروژه در هر نسل برای هر یک از پروژه‌های مکانیزاسیون کشاورزی در شکل‌های ۸، ۹ و ۱۰ آورده شده است.

چیدمان فعالیت‌ها

یکی از نتایج و خروجی‌های الگوریتم، چیدمان انجام فعالیت‌ها می‌باشد که ترتیب انجام هر فعالیت را نشان می‌دهد. نتایج چینش فعالیت‌های در جداول ۵ و ۶ نشان داده شده است. همانطور که قبلا در جدول ۲ و ۳ اشاره شد، ترتیب انجام فعالیت‌ها بر اساس داده‌های در دسترس می‌باشد و هیچ فعالیتی اجازه آغاز بدون گذارندن پیش‌نیازهای مربوط را ندارد.

جدول ۵- چیدمان بهینه فعالیت‌های پروژه مکانیزاسیون کلزا

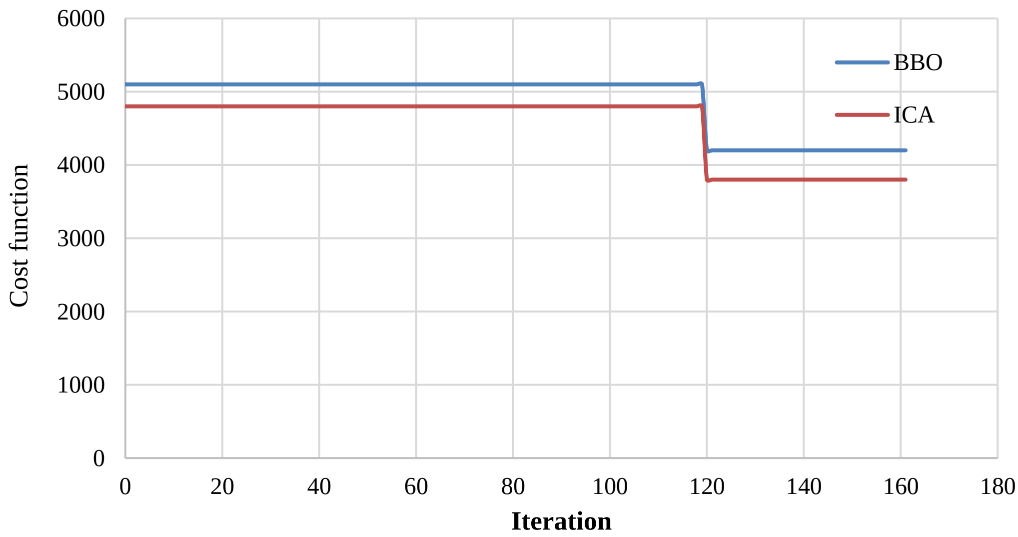
Table 5- Optimum arrangement of rapeseed mechanization project activities

ردیف Row	1	2	3	4	6	5	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
چینش Order	1	2	4	5	6	3	7	8	9	14	15	12	10	16	11	13	17	18	19	20
فعالیت‌ها Activities	R01	R02	R05	R06	R07	R04	R09	R12	R13	R22	R23	R16	R14	R24	R15	R17	R25	R29	R30	R33

جدول ٦- چیدمان بهینه فعالیت‌های پروژه مکانیزاسیون گندم

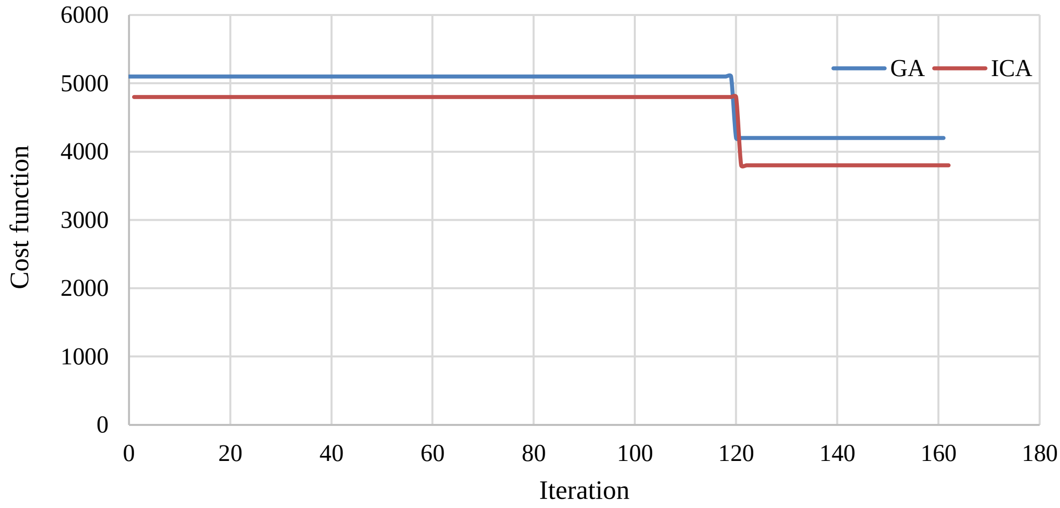
Table 6- Optimum arrangement of wheat mechanization project activities

ردیف Row	13	1	2	3	4	5	6	7	8	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
چینش Order	13	1	2	4	5	3	6	8	9	10	15	16	13	11	17	14	12	18	19	20	21	22	23
فعالیت‌ها Activities	W16	W 01	W 02	W 05	W 06	W 04	W 07	W 09	W 12	W 13	W 22	W 23	W 16	W 14	W 24	W 17	W 15	W 25	W 26	W 29	W 31	W 32	W 33



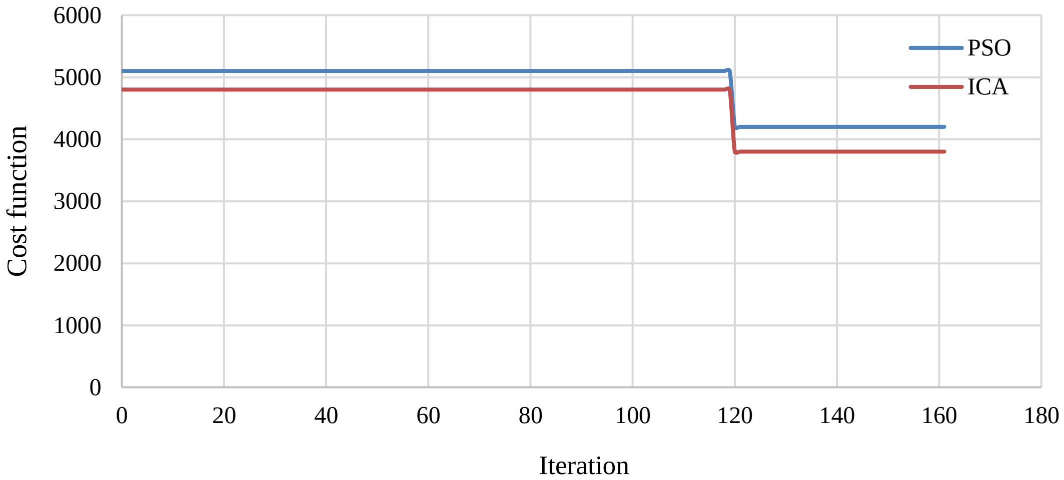
شکل ۸- مقایسه سرعت همگرایی دو الگوریتم BBO و ICA

Fig.8. Comparison of the speed of convergence of BBO and ICA algorithms



شکل ۹- مقایسه سرعت همگرایی دو الگوریتم ICA و GA

Fig.9. Comparison of the speed of convergence of ICA and GA algorithms



شکل ۱۰- مقایسه سرعت همگرایی دو الگوریتم PSO و ICA

Fig.10. Comparison of the speed of convergence of PSO and ICA algorithms

همان‌طور که در شکل‌های ۸، ۹ و ۱۰ مشخص شده است الگوریتم بهینه‌سازی مبتنی بر جغرافیای زیستی و الگوریتم پرندگان و الگوریتم ژنتیک به مقایسه با الگوریتم رقابت استعماری بهبود بهتری داشته و توانسته تابع هزینه را نسبت به روش‌های دیگر کاهش بهتری دهد. سیر نزولی نمودارها حاکی از عملکرد بهینه روش ارائه شده است. همچنین با توجه به شکل‌های اشاره‌شده، روش رقابت استعماری توانسته در زمان کمتری و در ایتریشن‌های آغازین جواب بهینه را به‌عنوان جواب نهایی اعلام کند.

نتایج جواب بهینه و بررسی همگرایی آن

در این قسمت از بررسی نتایج به سبب این‌که در جواب ارائه‌شده بین الگوریتم رقابت استعماری (Hosseini & Al Khaled, 2014)، الگوریتم پرندگان (Wang *et al.*, 2018)، الگوریتم ژنتیک (Dasgupta, Mandal, Dutta, Mandal, & Dam, 2013) و بهینه‌سازی مبتنی بر جغرافیای زیستی (Simon, 2008) تفاوت‌هایی وجود دارد، مقایسه بین این الگوریتم‌ها صورت گرفته است. به همین منظور، بررسی همگرایی الگوریتم‌ها به جواب بهینه مورد مقایسه قرارگرفته است. در همین راستا اطلاعات مربوط به پروژه مکانیزاسیون کشاورزی به ۴ الگوریتم داده شده است و نتایج آن‌ها از

جمله بهترین زمان تکمیل پروژه و میانگین زمان تکمیل پروژه در هر نسل برای هر یک از پروژه‌های مکانیزاسیون کشاورزی در شکل‌های ۸، ۹ و ۱۰ آورده شده است. همان‌طور که در شکل‌های ۸، ۹ و ۱۰ مشاهده می‌شود، روند همگرایی هر ۴ الگوریتم به سمت جواب بهینه می‌باشد که این بیانگر کارایی آن‌ها می‌باشد. در این بین الگوریتم ژنتیک به سرعت خود را به مقدار بهینه همگرا می‌کند که نشان از مشکل همگرایی زودرس در این الگوریتم می‌باشد و الگوریتم رقابت استعماری به‌تدریج و با گذشت زمان خود را به مقدار بهینه نزدیک می‌کند که علت آن هم این است که الگوریتم رقابت اسعماری جواب‌هایی را که در الگوریتم ژنتیک نامناسب تشخیص می‌دهد، آن‌ها را نیز بررسی می‌کند تا اگر در بین آن‌ها جواب‌ها مقدار بهینه‌ای هم وجود دارد لحاظ شود. به همین علت هم است که زمان پردازش الگوریتم رقابت استعماری نسبت به الگوریتم ژنتیک کمی زیاد است. پس از فرموله کردن مدل، برای یافتن جواب بهینه باید با استفاده از نرم‌افزار به حل مدل پرداخت. در این مقاله الگوریتم رقابت استعماری در مسائل ایجادشده، بررسی و تحلیل می‌شود. یکی از دلایل اصلی استفاده از الگوریتم رقابت استعماری آن است که در مبانی نظری مسائل بهینه‌سازی چندهدفه به‌عنوان یکی از کاراترین و پرکاربردترین روش‌های حل گزارش شده است. دلیل اصلی آن است که از ویژگی‌های الگوریتم ژنتیک و مفهوم پارتو به‌طور هم‌زمان بهره می‌برد؛ از سوی دیگر، هدف مقایسه با روش‌های فراابتکاری دیگر نظیر PSO, GA, ICA و BBO به‌عنوان یکی از روش‌های فراابتکاری پرکاربرد، ارزیابی کارایی الگوریتم در ابعاد بزرگ است. نتایج تجزیه و تحلیل داده‌های استاندارد با الگوریتم این تحقیق به نسبت سایر روش‌های مورد مقایسه کارایی خوبی دارد. همچنین با بررسی دقیق‌تر نتایج مشخص می‌شود که کارایی الگوریتم با افزایش تعداد فعالیت‌ها نسبت به سایر روش‌ها بهتر می‌شود. شاخص‌های دیگری که اغلب برای مقایسه روش‌های فراابتکاری استفاده می‌شوند، سرعت رسیدن به جواب و تعداد تکرارها برای رسیدن به جواب است. روش پیشنهادی این مقاله با توجه به حذف جواب‌های غیرموجه در مرحله اول، به نسبت سایر روش‌ها با سرعت بیشتر و تکرار کمتر به جواب می‌رسد. با توجه به گستردگی فعالیت‌های پروژه در دشت مغان عملکرد مدل ارائه‌شده در این مقاله به‌خوبی بررسی شده است. پروژه زمان‌بندی با محدودیت منابع در کلزا در حالت عادی در ۹۱ روز کاری محصول گندم در ۲۲۵ روز انجام می‌گرفت. که با استفاده از الگوریتم رقابت استعماری توانستیم این زمان را در کلزا به ۶۶ روز کاری و در محصول گندم به ۱۸۳ روز کاری برسانیم. همچنین هزینه مورد نیاز برای انجام محصول کلزا ۱۸۴۵۳ واحد پولی بوده است که با استفاده از الگوریتم رقابت استعماری به ۱۶۷۰۰ واحد پولی کاهش یافته است. همچنین در محصول گندم هزینه انجام کار در حالت عادی معادل ۵۱۵۲۴ بود که با استفاده از الگوریتم رقابت استعماری به ۴۸۲۹۱ واحد کاهش یافته است. ICA (الگوریتم رقابتی امپریالیستی) یک الگوریتم بهینه‌سازی فراابتکاری است که برای حل مسائل پیچیده بهینه‌سازی استفاده می‌شود. در مقایسه با سایر الگوریتم‌های بهینه‌سازی مانند BBO (بهینه‌سازی مبتنی بر جغرافیای زیستی)، GA (الگوریتم ژنتیک) و PSO (بهینه‌سازی ازدحام ذرات)، ICA دارای چندین مزیت است:

۱- همگرایی سریع‌تر: نشان داده شده است که ICA سریع‌تر از سایر الگوریتم‌ها همگرا می‌شود، به این معنی که می‌تواند راه‌حل بهینه را در مدت زمان کوتاه‌تری پیدا کند.

۲- کاوش و بهره‌برداری بهتر: ICA بهتر از سایر الگوریتم‌ها می‌تواند بین اکتشاف و بهره‌برداری تعادل برقرار کند، به این معنی که می‌تواند راه‌حل بهینه را پیدا کند و در عین حال مناطق مختلف فضای جستجو را نیز کاوش کند.

۳- استحکام: ICA از سایر الگوریتم‌ها قوی‌تر است، به این معنی که می‌تواند داده‌های پر سر و صدا یا ناقص را بهتر مدیریت کند.

۴- انعطاف‌پذیری: ICA را می‌توان به‌راحتی با انواع مختلف مسائل بهینه‌سازی تطبیق داد و آن را به یک الگوریتم همه‌کاره تبدیل کرد.

۵- مقیاس‌پذیری: ICA را می‌توان برای مسائل بهینه‌سازی در مقیاس بزرگ با متغیرها و محدودیت‌های بسیاری استفاده کرد.

به‌طور کلی، ICA یک الگوریتم بهینه‌سازی قدرتمند است که مزایای متعددی را نسبت به سایر الگوریتم‌های محبوب مانند BBO، GA و PSO ارائه می‌دهد. به‌عبارت دیگر الگوریتم‌های ژنتیک می‌توانند زمان‌بر باشند، به‌خصوص زمانی‌که اندازه مسئله بزرگ باشد. این به این دلیل است که الگوریتم باید تعداد زیادی از راه‌حل‌های بالقوه را قبل از یافتن راه‌حل بهینه ارزیابی کند، که یکی از معایب بزرگ این مساله است همچنین الگوریتم‌های ژنتیک ممکن است زودتر از موعد همگرا شوند، به این معنی که ممکن است به جای بهینه جهانی، راه‌حلی کمتر از حد بهینه (محلی) پیدا کنند. الگوریتم بهینه‌سازی مبتنی بر جغرافیای زیستی (BBO) به دلیل پیچیدگی محاسباتی و نیازهای حافظه برای مسائل در مقیاس بزرگ مناسب نمی‌باشد. الگوریتم بهینه‌سازی مبتنی بر جغرافیای زیستی (BBO) به‌آرامی به راه‌حل بهینه همگرا شده است، به‌ویژه برای نمونه‌های RCSP در مقیاس بزرگ، کمی زمان‌بر و از نظر محاسباتی گران است. همچنین الگوریتم BBO به دلیل وجود عملگر مهاجرت خود فاقد تنوع در جمعیت است، به همین دلیل منجر به همگرایی زودرس و راه‌حل‌های غیربهینه شده است. همچنین تنظیمات پارامترهای الگوریتم‌های ارائه‌شده در جدول ۷ ارائه شده است. جدول ۸ جهت ارایه مقدار تابع ارزیابی (شامل دو هدف هزینه و تاخیر) به‌ازای اجرای ۱۶۰ دوره اجرای الگوریتم می‌باشد. همانطور که از داده‌های ارائه‌شده در جدول ۸ مشخص است، الگوریتم رقابت استعماری با دستیابی به

همگرایی با بهترین مقدار در کوتاه‌ترین مدت، کـارایی قابـل‌توجهی را نشان داده است. این الگوریتم ثابت کرده است که در حل مسئله مورد نظر بسیار مؤثر است و برتری خود را نسبت به سایر الگوریتم‌ها نشان می‌دهد. در ادامه الگوریتم ژنتیک قرار دارد که عملکرد بسیار خوبی نیز از خود نشان داده است. اگرچه رسـیدن بـه همگرایـی در مقایسـه بـا الگوریتم رقابت استعماری کمی بیشتر طول کشید، اما همچنان از نظر کارایی و اثربخشی از سایر الگوریتم‌ها بهتر بـود. در نهایـت، الگـوریتم PSO (بهینه‌سازی ازدحام ذرات) را داریم که عملکرد قابل‌تحسـینی را نیـز بـه نمـایش می‌گـذارد. در حالی‌کـه همگرایـی در مقایسـه بـا الگوریتم‌های رقابت استعماری و ژنتیک کمی بیشتر طول کشـید، امـا همچنان نتایج رقابتی را نشان داد و ثابت کرد که یک گزینه مناسـب برای حل مسائل مشابه است. به‌طور خلاصـه، بـر اسـاس یافتـه‌های ارائه‌شده در جدول ۸، می‌تـوان نتیجـه گرفـت کـه الگـوریتم رقابـت استعماری با دستیابی به همگرایی با بهترین مقدار در کوتاه‌ترین زمان ممکن، بهتر از سایر الگوریتم‌ها عمل کرد. با این حال، هر دو الگوریتم ژنتیک و روش بهینه‌سازی ازدحام ذرات نیـز عملکـرد قـوی را نشـان می‌دهند و بسته به الزامات و محدودیت‌های خاص می‌توانند بـه‌عنوان گزینه‌های جایگزین در نظر گرفته شوند.

جدول ۷- تنظیم پارامترهای مورداستفاده در الگوریتم‌ها

Table 7- The parameters setting used in the algorithms

پارامترهای الگوریتم بهینه‌سازی مبتنی بر جغرافیای زیستی Parameters of optimization algorithm based on biogeography	پارامترهای بهینه‌سازی ازدحام ذرات Particle swarm optimization parameters	پارامترهای الگوریتم ژنتیک Genetic algorithm parameters	پارامترهای الگوریتم رقابت استعماری Parameters of ICA
VarMin =0.01 VarMax =1 NumOfIteration=160 nPop=50; Habitats (Population Size) KeepRate=0,2;	N = 30 Number of Portfolios VarMin =0.01 VarMax =1 Landa=0.02 Algorithmic Parameter Setting Number of particles P =50 NumOfIteration=160 Alfa=0.06 K=10	Initial population =300 Probability of crossover =0.8 Probability of mutation =0.2 NumOfIteration=160 VarMin =0.01 VarMax =1	'FitnesFunc'ProblemParams.NPar = 30 ProblemParams.VarMin = 0.01 ProblemParams.VarMax = 1 ProblemParams.landa = 0.02 AlgorithmParams.NumOfCountries = 200 AlgorithmParams.NumOfInitialImperialists = 10 AlgorithmParams.NumOfDecades = 50 AlgorithmParams.RevolutionRate = 0.7 AlgorithmParams.AssimilationCoefficient = 0.3 AlgorithmParams.AssimilationAngleCoefficient = .5 AlgorithmParams.Zeta = 0.02

جدول ۸- مقدار تابع ارزیابی به‌ازای ۱۶۰ دوره اجرای الگوریتم‌ها

Table 8- The value of the evaluation function for 160 iterations of the algorithms

Iteration	ICA	GA	PSO	BBO
20	4000	5500	7400	6000
60	4000	5500	7400	6000
100	4000	5500	4000	5300
125	3000	3200	3900	4000
160	3000	3200	3800	3910

نتیجه‌گیری

در برنامه‌ریزی یک پروژه، زمان‌بندی فعالیت‌هـای آن در حـداقل زمان ممکن جزء مهـم‌تـرین کارهـا محسـوب مـی‌شـود به‌خصـوص زمانی‌که از لحـاظ منـابع دچـار محـدودیت باشـد از اهمیـت خاصـی برخوردار خواهد بود. برای حل این‌گونه راه‌کارهای گوناگون ارائه شده که شامل روش‌های قطعی که جواب دقیق مسـأله در صـورت وجـود تضمین می‌کند. روش‌های فراابتکاری که بـرای حـل مسـائل بـزرگ مناسب نیستند و تنها راهکاری برای پروژه‌های بزرگ‌تر ارائه می‌دهند و روش‌های فراابتکاری که بـرخلاف روش‌هـای قطعـی و ابتکـاری، یافتن راه‌حل‌های نزدیک به بهینـه را بـرای مسـائل بـزرگ تضـمین می‌کنند. لذا روش‌های فراابتکاری بـرای حـل مسـائل RCPSP کـه بتواند زمان اجرای پروژه را به حداقل برساند می‌تواند بسیار مفید واقع شود. در این پژوهش از الگوریتم‌های رقابت اسـتعماری (ICA) بـرای حل مسأله RCPSP استفاده شده است. این الگوریتم دامنه گسترده‌ای از راه‌حل‌ها را مورد بررسـی قـرار مـی‌دهـد و همچنـین از همگرایـی زودرس و گیرکردن در بهینه‌هـای محلـی کـه برخـی از الگـوریتم‌هـا همانند الگوریتم ژنتیک دچار آن می‌شوند، جلوگیری می‌کند. الگوریتم پیشنهادی روی داده‌هایی از پـروژه‌هـایی مکانیزاسـیون کشـاورزی دو محصول کشت و صـنعت مغـان انجـام شـده اسـت و نتـایج حاصـل نشان‌دهنده همگرایی مناسب الگـوریتم در رسـیدن بـه جـواب بهینـه می‌باشد. ۱. استفاده کارآمد از منابع: ICA در RCSP خوب است زیـرا

به استفاده بهینه از منابع کمک می‌کند، تخصیص منابع به وظایف را بهینه می‌کند و اطمینان می‌دهد که هر منبع تا حداکثر ظرفیت خود استفاده می‌شود. ۲. بهبود دقت زمان‌بندی: ICA با در نظر گرفتن تمام محدودیت‌ها و وابستگی‌های موجود در فرآیند زمان‌بندی به بهبود دقت زمان‌بندی کمک می‌کند. این تضمین می‌کند که همه وظایف در مهلت‌های مربوطه تکمیل می‌شوند و هیچ تضاد یا هم‌پوشانی بین وظایف وجود ندارد. ۳. انعطاف‌پذیری: ICA یک رویکرد انعطاف‌پذیر است که می‌تواند با انواع مختلف RCSPها سازگار شود. می‌تواند مشکلات زمان‌بندی پیچیده را با محدودیت‌ها و وابستگی‌های متعدد مدیریت کند و برای طیف وسیعی از برنامه‌ها مناسب باشد. ۴. مقیاس‌پذیری: ICA مقیاس‌پذیر است، به این معنی که می‌تواند RCSPهای در مقیاس بزرگ را با وظایف و منابع زیادی مدیریت کند. حتی زمانی که تعداد کارها و منابع زیاد است، می‌تواند به‌طور موثر منابع را به وظایف اختصاص دهد. ۵. استحکام: ICA قوی است و می‌تواند عدم قطعیت‌ها و تغییرات در مدت زمان کار، در دسترس بودن منابع و سایر عواملی را که ممکن است بر فرآیند زمان‌بندی تأثیر بگذارد، کنترل کند. این تضمین می‌کند که برنامه زمانی بهینه باقی می‌ماند حتی زمانی‌که تغییرات یا اختلالات غیرمنتظره در سیستم وجود دارد به منظور بررسی کارایی الگوریتم پیشنهادی، این الگوریتم با الگوریتم‌های مختلف مقایسه گردید که نتایج خوب و قابل‌قبولی را از خود نشان داده‌اند. هدف از انجام این مقاله بررسی زمان‌بندی پروژه با منابع محدود با استفاده از الگوریتم فراابتکاری بود که به بررسی مساله بدر حالت ایستا پرداخته شده است (بدون در نظر گرفتن حالت‌های تصادقی و ناگهانی) به‌عنوان کارهای آتی می‌توان مساله را به‌صورت پویا در نظر گرفت.

References

1. Abdolshah, M. (2014). A review of resource-constrained project scheduling problems (RCPSP) approaches and solutions. *International Transaction Journal of Engineering, Management, & Applied Sciences & Technologies, 5*(4), 253-286.
2. Abdi, A. E. (2009). Planning and scheduling of agricultural mechanization projects with Gart networks.
3. Dumond, J., & Mabert, V. A. (1988). Evaluating project scheduling and due date assignment procedures: an experimental analysis. *Management Science, 34*(1), 101-118. https://doi.org/10.1287/mnsc.34.1.101
4. Dasgupta, K., Mandal, B., Dutta, P., Mandal, J. K., & Dam, S. (2013). A genetic algorithm (ga) based load balancing strategy for cloud computing. *Procedia Technology, 10*, 340-347. https://doi.org/10.1016/j.protcy.2013.12.369
5. Fekri, R., Amiri, M., Sajjad, R., & Golestaneh, R. (2016). Optimization of bank portfolio investment decision considering resistive economy. *Journal of Money and Economy, 11*(4), 375-400.
6. Gonçalves, G., Marques, P. A., Granadeiro, C. M., Nogueira, H. I., Singh, M. K., & Gracio, J. (2009). Surface modification of graphene nanosheets with gold nanoparticles: the role of oxygen moieties at graphene surface on gold nucleation and growth. *Chemistry of Materials, 21*(20), 4796-4802. https://doi.org/10.1021/cm901052s
7. Hourzadeh. (2013). Modeling and planning of resource allocation and cost-time balance of agricultural mechanization projects with PERT networks.
8. Hussain, K., Mohd Salleh, M. N., Cheng, S., & Shi, Y. (2019). Metaheuristic research: a comprehensive survey. *Artificial Intelligence Review, 52*, 2191-2233. https://doi.org/10.1007/s10462-017-9605-z
9. Küçüksayacıgil, F. (2014). Use of genetic algorithms in multi-objective multi-project resource constrained project scheduling.
10. Larrañaga, P. (2002). A Review on Estimation of Distribution Algorithms. In: Larrañaga, P., Lozano, J.A. (eds) Estimation of Distribution Algorithms. *Genetic Algorithms and Evolutionary Computation, 2*. Springer, Boston, MA. https://doi.org/10.1007/978-1-4615-1539-5_3
11. Mirjalili, S. (2019). Evolutionary algorithms and neural networks. Studies in computational intelligence, Springer. 780.
12. Paraskevopoulos, D. C., Tarantilis, C. D., & Ioannou, G. (2016). An adaptive memory programming framework for the resource-constrained project scheduling problem. *International Journal of Production Research, 54*(16), 4938-4956. https://doi.org/10.1080/00207543.2016.1145814
13. Simon, D. (2008). Biogeography-based optimization. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 12*(6), 702-713. https://doi.org/10.1109/tevc.2008.919004
14. Vartouni, A. M., & Khanli, L. M. (2014). A hybrid genetic algorithm and fuzzy set applied to multi-mode resource-constrained project scheduling problem. *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems, 26*(3), 1103-1112. https://doi.org/10.3233/ifs-120747
15. Wang, H., Lin, D., & Li, M. Q. (2005). *A competitive genetic algorithm for resource-constrained project scheduling problem*. 2005 International Conference on Machine Learning and Cybernetics, IEEE. https://doi.org/10.1109/icmlc.2005.1527446
16. Wang, F., Zhang, H., Li, K., Lin, Z., Yang, J., & Shen, X. L. (2018). A hybrid particle swarm optimization algorithm using adaptive learning strategy. *Information Sciences, 436*, 162-177. https://doi.org/10.1016/j.ins.2018.01.027

17. Xing, B., & Gao, W. J. (2014). Innovative computational intelligence: a rough guide to 134 clever algorithms, Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-03404-1